第27卷 第3期 腐蚀科学与防护技术 Vol.27 No.3
2015年5月 CORROSION SCIENCE AND PROTECTION TECHNOLOGY May 2015

专题介绍

接地网材料腐蚀与防护研究进展

魏巍[1] 吴欣强[1] 柯伟[1] 徐松[2] 冯兵[2] 胡波涛[2]

1. 中国科学院金属研究所 中国科学院核用结构材料与安全性评价重点实验室
辽宁省核电材料安全与评价技术重点实验室 沈阳 110016;
2. 湖南省电力公司科学研究院 长沙 410007

摘要:综述了国内外几种典型的变电站接地网材料的土壤腐蚀机制及研究现状,介绍了评价接地网材料耐蚀性的实验方法、接地网防腐措施及腐蚀检测技术,并给出了进一步的研究建议。

关键词:变电站 接地网 土壤腐蚀 防腐措施 检测技术

中图分类号:TG172 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-6495(2015)03-0273-05

1 前言

变电站接地网是维护电力系统安全可靠运行、保证人员和设备安全的关键构件[1]。理想的接地网材料应满足以下要求:(1) 能承受强大接地电流的热稳定性;(2) 对于变电站所处地区的土壤环境具有良好的耐蚀性,满足对接地网使用寿命的要求;(3) 资源丰富、获取方便、成本适中;(4) 易于加工成型和施工;(5) 对周围邻近的钢构架不产生加速腐蚀的影响。我国普遍采用的接地网材料为碳钢,在复杂的土壤环境中服役时很容易发生腐蚀,有的接地网甚至3~4 a就会腐蚀锈断,这给电力系统的安全运行造成很大威胁。由于接地网埋设在地下,面积大,对接地网的检查、维护及翻修改造等操作困难,费用巨大[2-7]。当前国内尚没有系统完备的接地网电气连接故障点及腐蚀诊断方法,盲目地对接地网开挖检查造成人力物力的大量耗费[8]。因此,研究接地网的腐蚀机理,改善接地导体材料的耐腐蚀性能,从根本上延长接地网的使用寿命对电力系统安全生产具有重要意义。

本文首先综述了国内外几种典型的变电站接地网材料的腐蚀机制,然后介绍了用于评价接地网材料耐土壤腐蚀性能的实验方法以及接地网的防腐措施和检测技术,最后给出了进一步的研究建议。

定稿日期:2014-08-07
基金项目:国家电网公司总部科技项目 (KG12K16004),国家重点基础研究发展计划项目 (2011CB610505) 和中国科学院金属研究所创新基金项目资助
作者简介:魏巍,女,1985年生,博士生
通讯作者:吴欣强,E-mail:xqwu@imr.ac.cn,研究方向为材料高温高压水腐蚀损伤行为、机理与评价
DOI:10.11903/1002.6495.2014.221

2 土壤腐蚀机制及国内外典型接地材料的研究现状

金属材料在土壤中的腐蚀与在电解质溶液中的腐蚀本质都是发生电化学腐蚀。我国许多变电站接地网材料为普通碳钢,由于土壤组成、结构和性质的不均匀性,接地网的不同部位间很可能存在电位差,通过土壤介质构成回路,形成腐蚀电池。电位较负的部位成为阳极区,发生接地网的腐蚀溶解,电位较正的部位成为阴极区,发生阴极反应。在阳极区碳钢溶解并释放出电子:

$$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-} \quad (1)$$

在酸性土壤中,Fe以水合离子的状态溶解在土壤水分中:

$$Fe^{2+} + nH_2O \rightarrow Fe^{2+} \cdot nH_2O \quad (2)$$

在中性或碱性土壤中,Fe^{2+}与OH^-进一步生成白色的$Fe(OH)_2$:

$$Fe^{2+} + 2OH^{-} \rightarrow Fe(OH)_2 \quad (3)$$

$Fe(OH)_2$在O_2和H_2O的作用下,生成难溶的$Fe(OH)_3$:

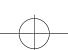
$$4Fe(OH)_2 + O_2 + 2H_2O \rightarrow 4Fe(OH)_3 \quad (4)$$

$Fe(OH)_3$不稳定,会接着发生以下的转化:

$$Fe(OH)_3 \rightarrow FeOOH + H_2O \quad (5)$$

$$2Fe(OH)_3 \rightarrow Fe_2O_3 \cdot 3H_2O \rightarrow Fe_2O_3 + 3H_2O \quad (6)$$

碳钢在土壤中生成的不溶性腐蚀产物与基体结合不牢固,保护性差,在投运后,碳钢接地网通常出现局部腐蚀,使接地网截面积减小,造成其接地性能不能满足热稳定性的要求[9,10]。由于土壤组成和性质的复杂性,金属在土壤中的腐蚀差别很大。以下是国内外几种典型接地网材料的研究现状及土壤腐蚀机制。



2.1 镀锌钢

我国电力系统普遍采用镀锌钢作为变电站防腐接地材料。实践表明，镀锌层会对基体碳钢起到一定的保护作用，但镀锌钢作为接地材料其耐蚀性较普通碳钢提高不大[11,12]。随着腐蚀的进行，锌层开始发生腐蚀，由于镀锌层的厚度有限且热浸镀过程中容易存在缺陷，部分锌层被破坏后，锌层作为牺牲阳极对钢基体提供阴极保护。当基体裸露面积增至一定范围时，镀锌层便不再能起到阴极保护的作用，基体开始腐蚀，锌的腐蚀产物会对腐蚀过程产生一定的抑制作用。随着腐蚀的进一步加重，基体发生快速腐蚀破坏。另外，变电站接地网中的杂散电流也会促进镀锌层的电解腐蚀。因此，镀锌钢对延长接地网使用寿命的作用不大。美国金属学会在《金属手册》中也不推荐碳钢在土壤中采用镀锌的方法来防腐[13]。

2.2 不锈钢

前苏联曾尝试使用不锈钢作为变电站接地材料。但不同类型的不锈钢在不同的土壤中的耐蚀性差别较大。国内外的一些关于不锈钢在土壤中的腐蚀规律的研究结果证明[14,15]：在酸性及中性土壤中，由于不锈钢表面钝化膜的保护作用使得其在土壤中的腐蚀速率较低。但在一些高碱性土壤中，由于Cl^-和SO_4^{2-}的含量较高，这些活性阴离子很可能在不锈钢表面钝化膜的缺陷位置上优先吸附，使被吸附处的钝化膜遭到破坏而呈现活化状态，形成点蚀坑。点蚀坑形成后，蚀孔的内外部构成了具有大阴极、小阳极特点的活化-钝化局部腐蚀电池，在自催化机理的作用下，腐蚀速度进一步增加。不锈钢的腐蚀速率随Cl^-和SO_4^{2-}含量的增加而增大，国内开展的埋设试验也证实了不锈钢在新疆、大港的高碱性土壤中产生了大量较深腐蚀坑[16]。另外，在透气性较差的土壤中，不锈钢的耐蚀性也会随之减弱[17]。

2.3 Cu

Cu一直以来是受人青睐的接地网材料。Cu在土壤中的腐蚀速率很低，而且铜和钢相比具有更好的塑性和导电性。美国和欧洲的一些国家直接使用铜作为接地网材料。美国标准局曾做过铜在土壤中的腐蚀研究表明：由于表面氧化膜的保护作用，Cu腐蚀速率呈逐年减小的趋势，最大年均腐蚀速率为1.05×10^{-5} mm/a。有文献中给出了国外接地装置中可能出现的金属埋在数十种土壤中进行腐蚀评估实验的平均结果[18]，从结果中可以看到：Cu的腐蚀速率仅为钢铁和Zn的1/8；从点蚀速率来看，钢铁的最大点蚀速率达到了1.4 mm/a，而Cu的最大点蚀速率不到0.2 mm/a，为钢铁的1/7。但也有研究表明Cu对酸性介质的防腐性能较差。伍远辉等[19]研究了酸雨作用下酸性土壤酸化过程中Cu的腐蚀行为，结果表明：在模拟酸雨淋溶的土壤中，Cu表面的腐蚀产物疏松，对基体金属的保护性差，酸雨溶液及土壤中的侵蚀性离子可以穿过腐蚀产物层到达基体表面从而腐蚀基体。随着模拟酸雨溶液pH值的增加，铜表面腐蚀产物的致密性增加。而在蒸馏水对比液淋溶的土壤中，Cu腐蚀轻微，因为Cu表面形成了致密的腐蚀产物层，阻碍侵蚀性离子从土壤向基体的扩散和腐蚀产物向土壤的扩散，从而对基体具有比较好的保护能力。可见，酸雨会加重酸性土壤中铜的腐蚀，土壤中可溶盐离子浓度越大，土壤的导电性越强，土壤中铜的腐蚀速率就越快。

除上述几种常见的接地网材料外，国内外市场上也出现了一些新型接地网材料[20]，研究较多的是铜钢复合材料，英、美等国家都制定了相关标准[21]。这些材料包括铜镀钢、铜铸钢、铜包钢等。铜钢复合材料具有和铜相似的耐蚀性，且在相同截面积下，抗拉强度是实心铜棒的2倍，同时采用铜钢复合材料可解决铜资源短缺的问题[22-26]。但由于国内这方面的研究起步较晚，铜钢复合材料能否满足国内输变电接地网所需机械、电气及耐蚀性的要求还需进行深入研究。综上所述，国内外大量文献资料表明：Cu、不锈钢以及铜钢复合材料在土壤中的耐蚀性能好于碳钢和镀锌钢，但作为接地网材料也存在着许多不足[27]，表1列举了上述典型接地网材料的综合比较结果。

3 评价接地网材料耐蚀性能的实验方法

评价接地网材料耐土壤腐蚀性能的实验方法主要分为室外现场埋设和室内加速腐蚀实验。

室外现场埋设是通过在典型的土壤中埋设大量试件，然后按照一定的埋设周期挖掘，测量得到试样的失重率和腐蚀速率。这种方法简单易行，所观察到的试样表面形貌和测得的数据能比较直观真实的反应出材料耐蚀性能的好坏，因而在早期国内外土壤腐蚀的研究中被使用广泛。但由于其实验周期长，不能准确及时的得到材料在土壤中的腐蚀细节以及腐蚀动力学方面的信息，因而无法满足对材料土壤腐蚀深入研究的需要。

室内加速腐蚀实验是一种人为控制实验条件而加速腐蚀的实验方法，力求在较短的时间内判断材料在介质中发生某种腐蚀的倾向。目前较为常见的几种加速方法见表2[28]。

上述几种方法中，除强化介质法外，都是通过外加电流来加速腐蚀，这难免与金属在实际土壤中的腐蚀行为存在差别。但作为一种模拟试验方法，其



表 1 典型接地网材料的综合比较结果

Material	Disadvantage	Corrosion rate / mm·a^{-1}	Applicable soil	Country
Carbon steel	Readily corrodible, short service-life	0.21	Uniform, clean, dry	China
Galvanized steel	Readily corrodible, short service-life	6.4×10^{-3}	Uniform, clean, dry	China
Stainless steel	Prone to pitting, high-cost	---	Low Cl^- and SO_4^{2-}	Soviet union
Copper	Poor corrosion resistance in acid soils, make adjacent steel corrosion fast, pollute the environment, insufficient resource, high-cost	9.8×10^{-7}~2.9×10^{-6}	Neutral or alkaline	America
Copper coated steel	Poor corrosion resistance in acid soils, steel core prone to pitting, pollute the environment, high-cost	9.8×10^{-7}~2.9×10^{-6}	Neutral or alkaline	Britain

表 2 几种土壤腐蚀的加速测试方法

Method	Principle	Advantage	Disadvantage
Intensify medium	Improve ionic concentration of soil solution	No influence of applied electric	The change of ion concentration is easy to cause the change of corrosion mechanism and corrosion products
Galvanic acceleration	Make up corrosion cell by short-circuit galvanic couple	Simple and effective	Accelerated corrosion through impressed current, it is difference from the actual soil corrosion
Electrolysis	Make materials anode polarization	Short test period, data with good reproducibility	Accelerated corrosion through impressed current, it is difference from the actual soil corrosion
Intermittent polarization	Rapidly make materials begin polarization and then stop	Short test period, data with good reproducibility	Accelerated corrosion through impressed current, it is difference from the actual soil corrosion
Environment accelerate	Control the soil temperature, water content and so on in actual test	Without introducing other ions	Accelerated corrosion through impressed current, it is difference from the actual soil corrosion

目的是在与室外现场埋设结果具有良好的相关性的前提下，起到加速实验的作用，并且具有可重复性，结合电化学测量结果，在相对较短的时间内对材料耐蚀性能的好坏作出定性的判断。

目前室内加速腐蚀实验的电化学研究中，试验介质主要有以下3种形式：(1) 依照土壤的理化数据配制土壤模拟溶液；(2) 将取自研究地区的土壤在一定量的纯水中充分搅拌、沉淀，得到上层土壤的水溶液；(3) 将取自研究地区的土壤经过干燥、研磨、过筛、烘干并与水混合配制成不同土壤湿度的水土混合液。其中，第一种形式最为常用。因为土壤模拟溶液能更好的控制溶液的酸碱度、阴阳离子种类和浓度、温度、溶解氧等参数，快速全面的考察不同材料在不同条件土壤中的耐蚀性能，并可通过对参数的调节，考察各个参数对腐蚀过程的影响，从而明确材料的腐蚀机制。

在实际研究中，应考虑研究材料、试样和研究土壤的特点选择合适的加速腐蚀实验方法，并通过腐蚀产物的表面或微观分析探讨腐蚀过程和机理，最后结合室外现场埋设的实验结果对材料耐蚀性能做出正确的评价。

4 接地网的防腐措施

目前，接地网的防腐措施主要分为改变接地材料性能、物理保护和电化学保护3种形式。

(1) 加大接地体截面。加大接地体截面是最直接的防腐措施，虽然能对腐蚀起到减缓作用。但对于那些严重腐蚀的地区无法从根本上解决问题，只会造成大量钢材的消耗，也给施工带来困难[29]。

(2) 热镀锌。我国电力系统普遍采用热镀锌钢作为防腐蚀接地材料。但热镀锌并非防腐蚀措施中

可靠的手段，在电流的作用下，热镀层很快就电解腐蚀掉。实际中已发现锌层遭到破坏的热镀锌钢并未控制腐蚀甚至使腐蚀更加严重的现象。

(3) 更换铜材接地网。虽然美国等西方国家使用铜材作为接地网材料，但目前在我国使用铜材接地网并未经过严格论证。铜材接地网的使用存在很多隐患。首先，Cu资源在我国相对匮乏，加之变电站的不断发展，用量巨大，成本高，因此推行铜材接地在我国并不现实。其次，由于Cu接地网的存在，邻近的构架钢筋和管线将和铜地网形成异种金属的互联，这将直接导致邻近钢材的腐蚀加速。第三，铜Cu对碱性介质有较好的防腐性能，但在酸性介质中的防腐性能则差强人意。由于大气中的酸雨及土壤中植物腐烂都将形成酸性土壤，因此并不适合用铜材作为接地网材料。此外，全世界对水资源土壤中Cu的含量都有严格的控制，土壤中的Cu可以通过食物链在人体和牲畜体内累积，直接或间接危害人体健康[30]。

(4) 阴极保护。阴极保护是一种电化学的方法，其中牺牲阳极法和外加电流法是两种最基本的方法。牺牲阳极法依靠电位较负的金属 (例如锌和镁合金) 的溶解来提供保护所需的电流。外加电流法则依靠外部的电源提供保护所需的电流。但因为变电站中存在大量地下电缆和钢构架等，并且与接地网相连，对变电站钢接地网实施经济可靠的阴极保护是很困难的。此外，外加电流的方法需依靠外部电源，需增加人员进行监视，而且也可能会导致周边其他未采取防护措施的金属腐蚀加速。

(5) 降阻剂。使用降阻剂对于降低接地网的接地电阻效果良好，但是由于含有导电性强的盐份，会增加对接地网的腐蚀。

(6) 导电防腐涂料。导电防腐涂料是依靠导电涂料隔离保护接地金属和土壤介质，但不影响接地金属向土壤介质排出泄流电流[31]。用导电防腐涂料防腐具有设计简单、施工方便等特点，但这种技术由于对导电涂料的导电性能和理化性能要求很高，并且施工现场必须对扁钢表面进行预处理，难以大规模在新建接地网和已发生腐蚀的老接地网中应用。并且，一旦存在涂层缺陷，由于腐蚀电流的高度集中，涂层缺陷处作为阳极会遭到严重的局部腐蚀，导致接地网材料迅速破坏。

综上所述，接地网的腐蚀与防护问题是电力系统能否安全运行的前提，但目前并没有行之有效的防腐措施解决接地网的腐蚀问题。我国地域辽阔，变电站所处的环境条件、土质情况千差万别，因此，对接地网的腐蚀防护应根据不同地区的实际情况采用不同的方法或几种方法联合使用，不能一概而论。同时，应加快研制导电性能良好、耐腐蚀性能优异、价格适中的新型接地网材料。

5 接地网腐蚀检测技术

国内外具有代表性的接地网腐蚀检测技术有以下几种[32-37]：

(1) 电阻测量法。电阻测量法是将接地网看作纯电阻电路，通过接地引下线向接地网注入电压并采集相应的端口数据，通过计算得到相邻的两段接地网引线间的端口电阻，接着将端口电阻和接地网的拓扑结构输入特定软件就会得到接地网的腐蚀程度和断点情况。该方法过于依赖接地网导体之间电阻的测量，受地下线数量和位置的限制，且检测过程中需要专业技术人员对测量节点进行实时调整，进行多次测量，可操作性差，不便于推广应用。

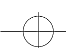
(2) 磁场测量法。磁场测量法是由接地引下线向接地网注入一股较大的电流，根据电磁感应理论，接地网会在地表形成磁场，通过磁场的特征便可判断地网是否已被严重腐蚀或者断裂，而后结合矩阵理论、数值计算及电路理论，采用一定的算法进行故障求解。此种方法的弊端在于仿真、模拟实验的接地网规模小、几何形状简单、假设的腐蚀点多为均匀分布，而变电站实际诊断中接地网结构参数往往难以获取，导致该检测方法工程实用性较差。

(3) 电化学测试法。电化学测试法是对接地网施加恒定阶跃电流，同时记录极化电位随着时间变化的曲线，通过解析充电曲线得到表征接地网腐蚀状态的极化阻力值。但应用此方法需考虑腐蚀电化学检测中测量传感器的限流和杂散电流的干扰问题。韩磊等[38]开发了适合现场应用的便携式快速检测系统，该系统中的限流探头解决了电流分布的问题，数据的滤波和拟合处理可以消除噪声干扰以及土壤电阻的影响，并且在一些发电厂和变电站的检测中取得了良好的结果。

6 存在的问题及建议

如何提高变电站接地网的服役寿命是电力系统发展面临的重要问题。在这一领域的研究和实践中存在的主要问题及研究建议如下：

(1) 国内所开展的系统、长时间、大规模的多种金属材料耐土壤腐蚀性的全面比较实验较少，很多纯金属材料及其合金缺乏足够的土壤腐蚀实验数据，难以确定其在不同地区的土壤中的腐蚀规律及腐蚀速率。建议持续开展相关实验，加强基础腐蚀数据的积累。



(2) 我国地域辽阔,变电站所处环境、土质情况千差万别。应加强土壤介质因素 (如温度、溶解氧、pH 值、阴阳离子种类和浓度等) 对接地网材料耐蚀性能的影响研究,针对性地选择相应的防护措施。

(3) 目前常见的几种接地网材料在耐蚀性、适应性、成本、对周边环境影响等方面还存在不足,新型接地网材料的研发应针对上述不足进行改进。例如可尝试在普通低碳钢的基础上热喷涂金属涂层或添加微量合金元素,在兼顾材料制造成本的前提下提高接地网的使用寿命。

(4) 在已开展的金属材料土壤腐蚀的研究中,大多是对几种金属的耐蚀性进行直观的比较,欠缺对材料腐蚀机理的深入认识。明确接地网材料在土壤中的腐蚀机理对进一步研究其防腐措施具有重要的指导意义。因此,应重视对腐蚀产物的分析,包括对比现场腐蚀产物和实验室模拟腐蚀产物,利用先进的表面和微观分析手段,还原腐蚀发生发展的过程,为防腐措施的研究和选择提供依据。

(5) 应加快接地网腐蚀检测技术的研究和应用。在无需停运和开挖的情况下对地网定期进行原位腐蚀检测,根据检测数据对接地网金属腐蚀倾向或腐蚀程度进行评价,以便及时发现接地网严重腐蚀的区域段,在未产生严重事故前及时采取有效补救措施,防患于未然。

参考文献

[1] 耿进锋, 时洪飞. 变电站接地网腐蚀与防护技术进展 [J]. 腐蚀与防护, 2009, 30(8): 523

[2] UL467. Standard for Grounding and Bonding Equipment [S]

[3] BS 7430. 1998 Code of Practice for Earthing [S]

[4] ANSI/IEEE Std 80-2000, IEEE Guide for Safety in AC Substation grounding [S]

[5] DL/T 621-1997. 交流电气装置的接地 [S]

[6] Lindsey T. National Electrical Grounding Research Project [R]. The Fire Protection Research Foundation, 2007

[7] 刘云玲. 变电站接地网存在的问题及改造措施 [J]. 腐蚀与防护, 2007, 28(9): 473

[8] 肖新华, 刘华. 接地网腐蚀和断点的诊断理论分析 [J]. 重庆大学学报, 2001, 24(3): 72

[9] 李谋成, 林海潮, 曹楚南. 碳钢在土壤中腐蚀电化学阻抗谱特征 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2000, 20(2): 111

[10] 金名惠, 孟厦兰, 黄辉桃. 碳钢在我国四种土壤中腐蚀机理研究 [J]. 华中科技大学学报, 2002, 30(7): 104

[11] Zhang X G. Corrosion and Electrochemistry of Zinc [M]. New York: Plenum, 1996

[12] 张红, 杜翠薇. 镀锌层破损汽车钢板在含NaCl溶液和泥浆中的腐蚀行为与EIS研究 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2009, 21(3): 333

[13] 美国金属学会主编. 金属手册 (第九版) 第一卷 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1988

[14] Thomas F L, Norman L F. The Effect of corrosion myths on national electrical standards [J]. IEEE Trans. Ind. Appl., 1993, 29(5): 1006

[15] 银耀德, 张淑泉. 不锈钢, 铜和铝合金酸性土壤腐蚀行为研究 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 1995, 7(3): 269

[16] 孙成, 李洪锡, 张淑泉. 不锈钢在土壤中腐蚀规律研究 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 1999, 11(2): 94

[17] 王永红, 鹿中晖. 几种线缆金属材料的土壤腐蚀特性 [J]. 材料保护, 2009, 42(8): 69

[18] 周佩朋, 王森, 李志忠. 耐蚀性金属接地材料研究综述 [J]. 电力建设, 2010, 31(8): 50

[19] 伍远辉, 刘天模, 孙成. 酸雨作用下酸性土壤酸化过程中铜的腐蚀行为 [J]. 四川大学学报, 2010, 42(1): 119

[20] 桑梓杰. 一种新型材料在接地网中的应用 [J]. 电气化铁道, 2004, (2): 26

[21] IEEE Standard 142—1991. Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems [S]

[22] 徐厚善. 优良的接地装置材料: 铜包钢导体 [J]. 电线电缆, 1998, 6(4): 21

[23] 高伟国. 镀铜接地棒在变电站接地网改造中的应用 [J]. 上海电力, 2004, (6): 529

[24] 杨书军. 铜覆钢接地材料在变电站工程中的应用 [J]. 新疆电力技术, 2013, (1): 44

[25] 韩钰, 马光. 铜钢复合材料及其在变电站地网中的应用前景 [J]. 电力建设, 2009, 30(10): 95

[26] 贺飞, 刘利梅, 钟云. 铜包钢线材及其生产工艺 [J]. 表面技术, 2007, 36(5): 78

[27] Romanoff M. Underground Corrosion [R]. United States Department of Commerce: National Bureau of Standards, 1957

[28] 陈沂. 接地网的土壤加速腐蚀与防护研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2009

[29] 苏宪华, 王程银. 变电所接地网防腐措施探讨 [J]. 山东电力技术, 2001, (4): 57

[30] 郑敏聪, 李建华, 聂新辉. 铜接地网对变电站周围环境的铜污染研究 [J]. 电力科技与环保, 2013, 29(3): 54

[31] 李进,杨鸿,李义山. 电力接地网导电涂料的研究 [J]. 材料保护, 2000, 33(9): 26

[32] 银耀德, 张淑泉, 高英. 金属材料土壤腐蚀原位测试技术 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 1995, 7(3): 266

[33] 洪海涛. 接地网状态综合检测分析方法及其实现 [D]. 长沙: 湖南大学, 2009

[34] Rudenberg R. Grounding principles and practice [J]. Electr. Eng., 1945, 64: 1

[35] Thapar B, Puri K. Mesh potentials in high-voltage grounding grids [J]. IEEE Trans. Power Apparatus Syst., 1967, 86: 249

[36] Zaborszky J. Efficiency of grounding grids with nonuniform soil [J]. IEEE Trans. Power Apparatus Syst., 1955, 74: 1230

[37] Schwarz S J. Analytical expressions for the resistance of grounding ing systems [J]. IEEE Trans. Power Apparatus Syst., 1954, 73: 1011

[38] 韩磊, 宋诗哲. 便携式接地网腐蚀电化学检测系统及其应用 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2009, 21(3): 337

